: https://dx.doi.org/10.22067/jgrd.2022.71862.1059
مقالهٔ پژوهشی- مطالعه موردی

مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال نوزدهم، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱٤۰۰، شمارهٔ پیاپی ۳۷

شناسایی و پهنه‌بندی نقاط داغ آلاینده دی اکسید نیتروژن هوای مشهد

رضا اسماعیلی (دکتری آب و هواشناسی، معاونت محیط‌زیست و خدمات شهری شهرداری مشهد، ایران، نویسندهٔ مسئول)

r.esmaili.n@gmail.com

محمد پذیرا (کارشناس ارشد بهداشت محیط، معاونت محیط‌زیست و خدمات شهری شهرداری مشهد، ایران)

m_pazira@yahoo.com

صص ۳۸۱ ـ ۳۵۹

چکیده

دی اکسید نیتروژن (NO_2) یکی از آلاینده‌های معیارهوا محسوب می‌شود که علاوه‌بر اثرات سوء بهداشتی، پیش‌نیاز تشکیل ترکیبات خطرناک جوی نیز است. در پژوهش حاضر براساس ۸٤ نقشه ماهانه که از حداکثر تعداد ایستگاه‌های کیفیت هوا با طولانی‌ترین دوره آماری ممکن ترسیم شده است، چهار نقشه فصلی پراکنش این آلاینده برای مشهد تهیه شد. سپس با استفاده از شاخص آماری گتیس-ارد-جی (Getis –Ord-Gi) نقاط داغ روی نقشه‌های فصلی شناسایی شد. در ادامه با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی، پهنه‌بندی نواحی همگن NO_2 شهر مشهد به دست آورده شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، الگوی مکانی تشکیل هسته نقاط داغ در تمامی فصول مشابه با هم است و اکثر مناطق شرق و شمال شرق مشهد کانون غلظت‌های زیاد این آلاینده است. از لحاظ غلظت NO_2 سطح شهر مشهد را می‌توان به سه پهنه یا منطقه همگن تفکیک کرد. منطقه ۱ با غلظت متوسط، ۲٤ درصد از مساحت شهر را در نواحی جنوب و جنوب غربی مشهد در برگرفته است. منطقه ۲ دارای کمترین غلظت بوده و نیمی از مساحت شهر (۵۰ درصد) که عمدتاً منطبق بر

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۱۱/۱۲ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۰٦/۰۸

نیمه غربی است، در این پهنه قرار دارد و پهنه ۳ یا منطقه دارای غلظت زیاد، مناطقی از شرق و شمال شرق مشهد را در بر می‌گیرد. در واکاوی دلایل غلظت زیاد در پهنه ۳، می‌توان به مواردی همچون تراکم بیشتر جمعیت نسبت بـه منـاطق دیگـر، ضـعف زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل شهری، بافت فرسوده شهری، وسایل نقلیه موتوری غالباً مستهلک و دودزا، مجاورت با واحدهای تولیدی و صنعتی حاشـیه شـهر اشـاره کرد.

کلیدواژه‌ها: دی اکسید نیتروژن، مشهد ، نقاط داغ، پهنه‌بنـدی، شـاخص گتـیس-ارد-جی.

۱. مقدمه

رشد جمعیت، توسعه کشاورزی، گسترش شهرها، پیشرفت صنعت و افزایش حمل و نقـل موتوری در اکثر نقاط جهان به‌ویژه کلان‌شهرهای کشورهای در حال توسعه آلودگی هوا را بـه معضل بزرگ زیست‌محیطی تبدیل کرده است. ازجمله مهم‌تـرین آلاینـده‌هـای هـوای شـهرها می‌توان به ذرات معلق، مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسیدگوگرد و ازن اشاره کـرد. براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO)، آلودگی هوا به‌عنوان یکی از ده عامل مهم افزایش مرگ و میر در دنیا مطرح است؛ به‌طوری‌که میزان مرگ و میر ناشی از آن سالانه حدود هفت میلیون نفر گزارش شده است. امروزه زندگی بیش از یک میلیارد نفر از مردم دنیا به‌دلیل آلودگی هوای شهری در معرض تهدید است (جولایی، پیروی، اسـماعیلی، کتـابی و متعلمـی، ۱۳۹٦، ص. ۳٤؛ خرسندی، امینی، کارگر و موسوی مغانجوقی، ۱۳۹۱، ص. ۷٦۷؛ کیم ، کبیـر و کبیر[1]، ۲۰۱۵، ص. ٤٤). در سراسر جهان آلودگی هوا عامـل ۲۵ درصد از کـل مـرگ‌هـا و بیماری‌های ناشی از سرطان ریه، ۱۷ درصد از کل مرگ‌ها و بیماری‌های ناشی از عفونت حاد تنفسی تحتانی، ۱٦ درصد از کل مرگ‌ها به علت سکته مغزی، ۱۵ درصد از کـل مـرگ‌هـا و بیماری‌های ناشی از بیماری ایسکمیک قلب، ۸ درصد از کل مرگ‌ها و بیماری‌هـای ناشـی از انسدادی مزمن ریوی برآورد شده است (ناندا، کانت، گاپتا و میترا[2]، ۲۰۱۸، ص. ۳۳۹).

1. Kim, Kabir & Kabir
2. Nanda, Kant, Gupta & Mitra

در میان آلاینده‌های اصلی هوا، اکسیدهای نیتروژن (NO_x) ارتباط نزدیکی با مصرف سوخت‌های فسیلی توسط انسان دارد؛ به‌نحوی‌که در ۲۰ سال گذشته نرخ انتشار NO_x در مقایسه با سایر آلاینده‌های هوا بیشتر بوده است. در کشور چین هم‌زمان با توسعه اقتصادی و مصرف مداوم از منابع طبیعی مختلف، سطح تولید آلاینده‌های ثانویه ازجمله ذرات معلق (PM_{10})، ازن (O_3) و دی اکسید نیتروژن به‌طور درخور توجهی در مناطق شهری افزایش یافته است. مطالعات نشان داده است که آلاینده NO_x به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم آلودگی منطقه‌ای جو و کاهش کیفیت محیط‌زیست مطرح است؛ به‌نحوی‌که نقش مهمی در تشکیل ازن (O_3) تروپوسفر، نیترات پراکسی استیل (PAN) و آئروسل ها دارد. NO_xها شامل ترکیبات متنوعی ازجمله نیتروز اکساید (N_2O)، نیتریک اکساید (NO ,NO_2)، دی نیتروژن تری اکساید (N_2O_3) و دی نیتروژن تتراکساید (N_2O_4) است که در این میان، NO و NO_2 به‌عنوان مهم‌ترین ترکیبات NO_x در جو مطرح است که از طریق تولید اسید نیتریک و نیترات به وسیله اکسیداسیون NO_2 (از طریق فتو اکسیداسیون NO هیدروکربن‌ها (HC) و ازن (O_3))، بر سلامت انسان و محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. NO می‌تواند سبب تحریک سیستم تنفسی شود. همچنین از طریق اتصال به هم[1] خون، ماده سمی نیتروزهموگلوبین تولید کند. NO_2 می‌تواند سیستم تنفسی را به شدت تحریک کند و منجر به نیتراتاسیون هم خون شود و از نظر زیست‌محیطی از NO مضرتر است؛ زیرا موجب باران اسیدی می‌شود (وانگ، وانگ، تان و فانگ[2]، ۲۰۲۰، ص. ۱؛ ژانگ، گنگ و وانگ[3]، ۲۰۱۲، ص. ۲۸۵۸؛ ژانگ، استریتس و هی[4]، ۲۰۰۷، ص. ۲؛ وارشنی و سینگ[5]، ۲۰۰۳، ص. ۱۲۸).

بررسی‌های متعدد انجام‌شده روی ساکنان مناطق نزدیک به معابر اصلی در زمینه تأثیر آلاینده‌های متداول هوای شهر ازجمله CO_2، CO، NO_x، SO_2، ذرات معلق و... نشان می‌دهد که قرار گرفتن در معرض طولانی این آلاینده‌ها خطر مرگ و میر و ابتلا به بیمارهای قلبی و

---

1. heme
2. Wang, Wang, Tan & Fang
3. Zhang, Geng & Wang
4. Zhang, Streets & He
5. Varshney & Singh

ریوی را افزایش می‌دهد. در همین ارتباط نتایج مطالعه‌ای، افزایش غلظت آلاینده‌های NO_2 و NO_x در مناطق نزدیک به جاده ها و معابر اصلی شهرها را گزارش داد (کو[1]،۲۰۲۰، ص. ۳).

مطالعات نشان می‌دهد غلظت زیاد NO_2 در مناطق شهری باعث سرطان برونش و سرطان ریه و ایجاد اثرات شدید روی بیماران مبتلا به آسم می‌شود. در ۱۵ کشور اتحادیه اروپا متوسط هزینه‌های پزشکی-اجتماعی ناشی از آلودگی NO_2 در هوا تقریباً ٤/۸۵ بیلیون دلار در هر تـن برآورد شده است؛ به همین دلیل و به‌منظور کاهش هزینه‌های اجتماعی این آلاینده، بسیاری از کشورها ازجمله کشورهای اتحادیه اروپا اقدام به برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در این زمینه از طریق توافق نامه سیاست یکپارچه زیست‌محیطی در بخش‌های حمل و نقل، صـنایع و انـرژی در سطوح منطقه‌ای و محلی کرده‌اند. علاوه بر این، از سال ۲۰۱۳ کشور چین از طریـق نصـب کاتالیست‌های تجهیزات کاهش دهنده (SCR[2]) در نیروگاه ها بـه‌منظـور کـاهش سـطح NO_2 به‌عنوان یکی از برنامه‌های کنترل آلودگی هوا اقدام کرده است (ریا، پارک وجون[3]، ۲۰۱۹، ص. ۲؛ سی‌اِی‌اِی‌سی[4]، ۲۰۱۳، ص. ۲؛ تکنولوژی محیطزیست اِی‌اِی‌آ[5]، ۲۰۰۵، ص. ١٤).

۲. پیشینهٔ تحقیق

در حال حاضر، پایش و بررسی ویژگی‌هـای زمـانی و مکـانی کیفیـت هـوا از سـه طریـق امکان‌پذیر است: مطالعات برمبنای سنجش از راه دور و بـا اسـتفاده از عمـق نـوری آئروسـل (AOD[6])، مطالعات با استفاده از ایستگاه‌های پایش زمینی و درنهایت مطالعات بر پایـه مـدل-سازی که تکمیل‌کننده بررسی‌های ماهواره‌ای و زمینی است. مطالعات بـا اسـتفاده از داده‌هـای سنجش از دور معمولاً در مناطق با مقیاس بزرگ و به‌منظور دستیابی به مطالعه جامع از منطقـه قابل کاربرد است. به‌دلیل کنترل شده بودن (به لحاظ زمانی) داده‌های به‌دست‌آمده از پایش‌های

1. Ku
2. Selective Catalytic Reduction
3. Ryu, Park & Jeon
4. CAAC (Clean Air Alliance of China)
5. AEA Technology Environment
6. Aerosol optical depth

زمینی، عموماً از این داده‌ها برای بررسی الگوهای فصلی و روزانه در مناطق با مقیاس متوسط و کوچک مانند منطقه شهری کاربرد دارد (لی، دای، یانگ و ما[1]، ۲۰۱۹، ص. ۳).

اخیراً استفاده از فناوری و مدل‌های آماری و تحلیلی جدید سبب گسترش دانش و یافته‌های محققان در زمینه مطالعات آلودگی هوا شده است؛ به‌ویژه به‌کارگیری تکنیک‌های آماری–فضایی به‌منظور شناسایی الگوهای زمانی و مکانی آلاینده‌ها کاربرد گسترده یافته است. در تحلیل فضایی داده‌ها، پراکندگی داده‌های جغرافیایی به لحاظ قوانین، نظام و الگوهای فضایی بررسی می‌شود؛ به عبارت دیگر تحلیل فضایی از مجموعه‌ای از مهارت‌های کارتوگرافی و روش‌های ریاضی و آماری برای پردازش و تحلیل داده‌های فضایی استفاده می‌کند؛ به عبارتی ساده‌تر تحلیل فضایی با استفاده از مهارت‌ها و روش‌های گوناگون تلاش می‌کند الگوهای فضایی پراکندگی‌ها را شرح دهد. مهم‌ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده‌هاست (علیجانی، ۱۳۹٤، ص. ۲).

در همین ارتباط، توزیع فضایی و محلی داده‌های شاخص کیفیت هوا[2] (AQI) ثبت‌شده در ١٦١ شهر مهم چین با استفاده از شاخص موران بررسی و ارزیابی شد و تأثیرگذارترین پارامترهای شهری مؤثر بر این شاخص تعیین گشد (پو، لو، وانگ، وانگ و کانگ[3]، ۲۰۱۷، ص. ٤٤٥٧). در مطالعه انجام‌شده در شهر مادرید اسپانیا از ابزارهای آماری تجزیه و تحلیل همبستگی، تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA[4]) و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA[5]) به‌منظور ارزیابی آلاینده‌های هوا (NO، NO_2، PM_{10} و O_3) در ۲۲ ایستگاه طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد، همبستگی قوی بین آلاینده‌های هوا با ساختارهای فضایی سطح شهر وجود دارد که در این زمینه با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌ای، برنامه‌ها و اقدامات پیشنهادی به‌خصوص در حوزه ترافیک

1. Li, Dai, Yang & Ma
2. Air Quality Index
3. Pu, Luo, Wang, Wang & Kang
4. Principal Component Analysis
5. Cluster Analysis

به‌منظور بهبود کیفیت هوا تدوین شد (نانز–آلونسو، ویسنت، منـزور و کاسـرس[1]، ٢٠١٩، ص. ٣).

در همین ارتباط الگوی پراکنش غلظت آلاینـده $PM_{2.5}$ و ارتبـاط آن بـا عـواملی همچـون کاربری‌های جمعیتی، پارامترهای هواشناسی، فاصله از معـابر اصـلی و آزادراه‌هـا و ارتفـاع در شهر تهران با استفاده از رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) مطالعه شد. درنهایت نقشه‌هایی از وضعیت $PM_{2.5}$ تهران با هدف شناخت مناطق پرریسک و پیش‌بینی و به‌کارگیری اقـدامات مؤثر برای کاهش آلودگی در آن نقـاط تهیـه شـد (بهـاری، عباسـپور، و پهلـوانی، ١٣٩٤، ص. ١٦٥).

توزیع زمانی و مکانی شاخص آلاینده‌های هوای مشهد و عوامل مؤثر بر آن در سـال ١٣٩١ بررسی شد (تقوی،١٣٩١). نواحی همگن آلودگی هوای مشـهد از لحـاظ بـار ذرات معلـق بـا استفاده از GIS و روش تحلیل خوشه‌ای شناسایی شد که نتایج این تحقیق سه منطقه همگن و مجزا را (منطقه کم‌غلظت در شمال غرب ، منطقه آلوده با غلظت زیاد ذرات معلق در شـرق و منطقه جنوب شرق و منطقه حائل با بار آلودگی متوسط) برای مشهد مشخص کرد (اسماعیلی، ١٣٩٧، ص. ٢٢٧). به‌رغم تعـدد مطالعـات در زمینـه آلـودگی هـوای مشـهد، بررسـی سـوابق مطالعاتی در زمینه NO_2 نشان می‌دهد، علاوه‌بر فقدان مطالعـات فضـایی روی ایـن آلاینـده در شهر مشهد، موارد موجود بیشتر به صورت موردی یا دوره‌هـای آمـاری کوتـاه‌مـدت صـورت گرفته است؛ ازاین‌رو در این پژوهش سعی شده است با استفاده از حداکثر تعداد ایستگاه‌هـای سنجش کیفیت هوا و طولان ترین دوره آماری ممکن، ضمن ترسیم نقشـه‌هـای فصـلی، بـرای اولین بار پهنه‌بندی و نواحی همگن NO_2 برای این کلان‌شهر کشور صورت گیرد.

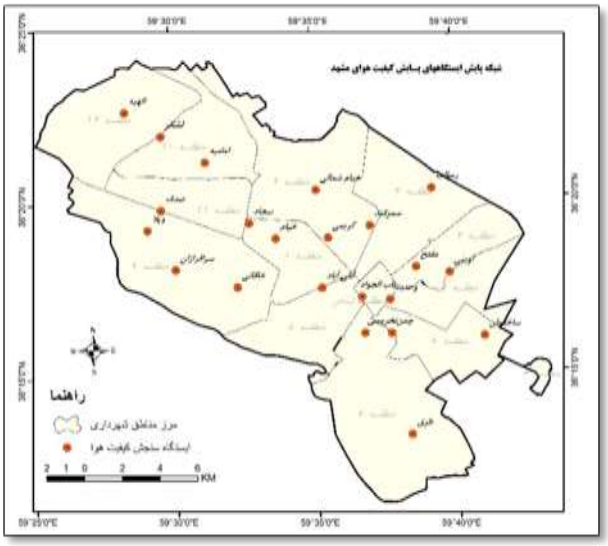
٣. روش‌شناسی تحقیق

مشهد با جمعیت ٣,٠٠١,١٨٤ نفر (سرشماری نفوس ومسکن سال١٣٩٥) دومین کلان‌شـهر کشور محسوب می‌شود که از لحاظ موقعیت در ́ ٣٥ °٥٩ طول جغرافیایی و ́ ١٤ °٣٦ عرض

1. Nunez-Alonso, Vicente, Manzoor & Caceres

جغرافیایی، دارای ۳۲۸ کیلومترمربع مساحت و درارتفاع ۹۹۰ متری از سطح دریا قرار دارد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷).

شهر مشهد دارای ۲۳ ایستگاه سنجش کیفیت هواست که ۱۲ایستگاه (صدف، تقی‌آباد، طرق، ماشین ابزار، ویلا، پارک وحدت، شهرک لشگر، رسالت، شهرک شهید رجایی (ساختمان)، نخریسی، سجاد، خیام) متعلق به اداره کل حفاظت محیط‌زیست خراسان رضوی و ۱۰ ایستگاه (شهید آوینی، خیام شمالی، چمن، مفتح، سمزقند، سرافرازان، خاقانی، امامیه، شهید کریمی، الهیه) متعلق به شهرداری مشهد است و ایستگاه واقع در حرم مطهر امام رضا (ع) نیز متعلق به اداره کل هواشناسی خراسان رضوی است. شبکه موجود زیر نظارت و مدیریت یکپارچه مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد، پایش، تجمیع، پردازش و اطلاع‌رسانی را به‌صورت متمرکز انجام می‌دهد. در شکل ۱ شبکه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد نشان داده شده است (مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی شهر مشهد، ۱۳۹٦، ص. ٤۲).



شکل ۱- شبکه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد

مأخذ: مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شهر مشهد، ۱۳۹٦

دی اکسید نیتروژن (NO_2) به‌عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی در ۲۰ ایستگاه سطح شهر سنجش می‌شود. داده‌های غلظت روزانه آلاینده مدنظر برای ایستگاه‌های فعال در دوره آماری هفت‌ساله (از ۱۳۹۳/۱/۱ تا ۱۳۹۹/۱۲/۲۹) از مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد گردآوری شد. در گام نخست، داده‌های پرت[1] شناسایی شد و درستی یا نادرستی داده‌ها بررسی و تأیید شد. سپس میانگین غلظت این آلاینده برای هر ماه در هر ایستگاه محاسبه شد. برای ترسیم نقشه‌ها، داده‌ها به محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی منتقل شد و با استفاده از تابع درون‌یابی، مقادیر ماهانه غلظت NO_2 ایستگاه‌ها روی توری با یاخته‌های ۵۰۰ در ۵۰۰ مترگسترانیده و تعمیم داده شد؛ بنابراین سطح شهر مشهد با ۱۲٤۷ یاخته یکسان دارای مقادیر عددی اختصاصی پوشش داده شد که مبنای محاسبات آماری و فضایی بعدی قرار گرفت. در ادامه ۸٤ نقشه ماهانه ترسیم شد که با ترکیب با همدیگر به مقیاس فصلی و سالانه تبدیل شد. در مرحله بعد با استفاده از ابزار تجزیه و تحلیل مکانی (GIS) و بکارگیری آماره گتیس–ارد–جی[2] تحلیل نقاط داغ پرداخته شد. درنهایت با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد (Ward) مناطق دارای تشابه حداکثری گروه‌بندی شد؛ به‌عبارتی نواحی همگن یا یکسان از لحاظ غلظت آلاینده NO_2 شناسایی و مشخص شد. در ادامه به واکاوی دلایل شکل‌گیری نقاط داغ و نقشه پهنه‌بندی نهایی پرداخته شد. برای این منظور از بانک اطلاعات جغرافیایی پایگاه داده‌های زیر ساخت مکانی (SDI) سازمان فاوای شهرداری و لایه-های اطلاعاتی شامل خطوط ارتباطی و حمل و نقل، ارتفاع سطح شهر، حجم تردد، تراکم جمعیت، متوسط سرعت حرکت وسایل نقلیه استفاده شد که در ادامه روش تحلیل فضایی و مدل مفهومی انجام پژوهش به‌اختصار بیان شده است (شکل ۲).

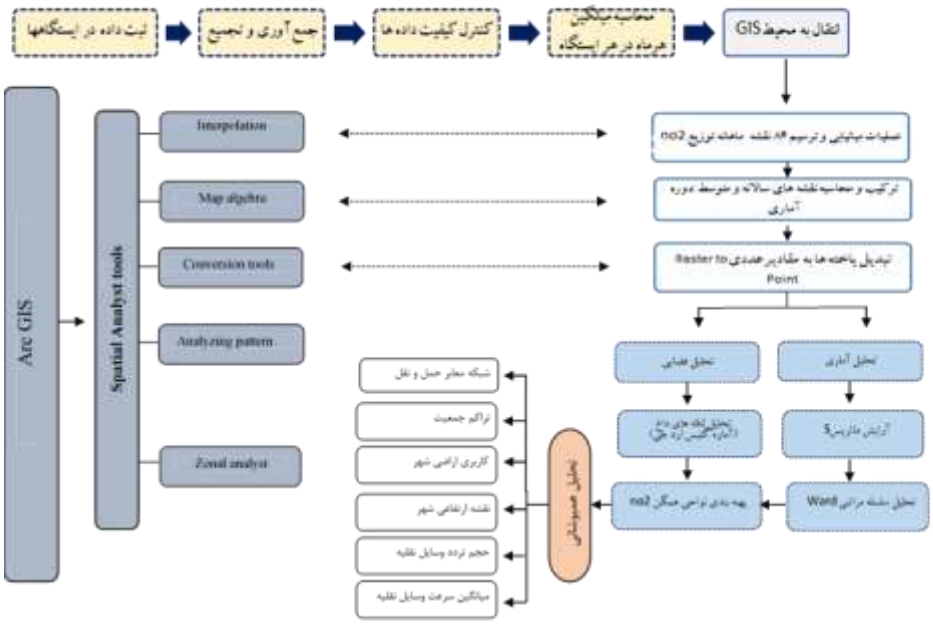
ظهور و توسعه فناوری‌ها و مدل‌های آماری و تحلیلی جدید باعث توسعه توانمندی پژوهشگران در واکاوی های علمی ازجمله آلودگی هوا شده است؛ ازاین‌رو به‌کارگیری روش‌های تحلیلی توأمان آماری–فضایی کاربرد وسیعی پیدا کرده است. درحقیقت، تحلیل فضایی داده ها می‌کوشد دانش نهفته در پراکندگی داده‌های جغرافیایی یعنی قوانین، نظام و

1. Outlier
2. Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi)

الگوهای فضایی را کشف کند؛ به عبارت دیگر تحلیل فضایی مجموعه‌ای از مهارت‌های کارتوگرافی و روش‌های ریاضی و آماری را معرفی می‌کند که برای پردازش و تحلیل داده‌های فضایی به کار می‌رود. مهم‌ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده‌هاست (علیجانی، ۱۳۹٤، ص. ۳).

خودهمبستگی فضایی برای شناسایی شباهت پدیده‌های نزدیک به هم از طریق ارزیابی توزیع جغرافیایی مجموعه مشخصی از ویژگی‌ها به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی طبق مشخصه‌های مرتبط استفاده می‌کند. از خودهمبستگی فضایی به‌عنوان یک ابزار مهم تحلیلی در علم GIS و علوم محیطزیست برای شناسایی لکه‌های داغ آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شود (نادیان، میرزایی و سلطانی محمدی، ۱۳۹۷، ص. ۱۹۸؛ چو، هانگ و لین[1]، ۲۰۱۵، ص. ۱۷۸؛ وانگ و فنگ[2]، ۲۰۱٦، ص. ۱۵۳). در همین ارتباط، تحلیل نقاط داغ یا آماره گتیس–ارد–جی برای بررسی دقیق‌تر توزیع فضایی لکه‌های داغ[3] یا خوشه مکانی با مقادیر زیاد و لکه‌های سرد[4] یا خوشه مکانی با مقادیر کم استفاده می‌شود. این آماره در سه کلاس ۳±، ۲ ± و ۱± و در سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد به کار گرفته می‌شود. مقادیر زیاد G نشان‌دهنده خوشه‌های مکانی با مقادیر زیاد (نقاط داغ) و مقادیر کم G نشان‌دهنده خوشه‌های مکانی با مقادیر کم (نقاط سرد) است (نادیان و همکاران، ۱۳۹۷، ص. ۲۰۲؛ خسروی و بحری، ۱۳۹۷، ص. ۳۷).

1. Chu, Huang & Lin
2. Wang & Fang
3. Hot Spot
4. Cold Spot



شکل ۲- مدل مفهومی انجام پژوهش

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۰

٤. یافته‌های تحقیق

٤. ۱. ویژگی‌های آماری آلاینده NO_2

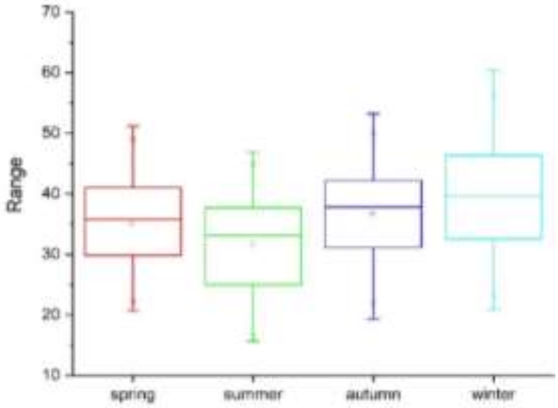
از بین شبکه ایستگاه‌های مشهد (شکل ۱) تعدادی از ایستگاه‌ها به‌دلیل از کار افتادگی مقطعی یا نقص فنی که ثبت داده‌های غیرموثق یا داده‌های پرت شده است، از محاسبات کنار گذاشته شده‌اند و درنهایت با در نظر گرفتن کمیت و کیفیت داده‌ها ۱۷ ایستگاه در ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های فضایی استفاده شده است. مطابق جدول ۱، بیشترین غلظت NO_2 مربوط به ایستگاه‌های آوینی و چمن و کمترین آن‌ها از ایستگاه‌های حرم مطهر، صدف و لشکر در غرب مشهد گزارش شده است؛ بااین‌حال بیشترین انحراف معیاردر ایستگاه امامیه ثبت شده است. بیشترین اختلاف بیشینه و کمینه را ایستگاه‌های چمن و آوینی که میانگین بیشتری داشتند، تجربه کرده‌اند. نکته درخور توجه این است که ایستگاه‌های اشاره‌شده (به‌جز حرم مطهر و لشکر) جزو ایستگاه‌های ترافیکی محسوب می‌شوند.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری ایستگاه‌های موردمطالعه

	میانگین	انحراف معیار	واریانس	دامنه (بیشینه –کمینه)
نخریسی	۲۸/٤	۷/۲	٥۱/٦	۳٤/٤
ساختمان	۲۱/۸	٦/٤	٤۱/٤	۲٦/۳
سجاد	۳۲/۳	۹/۳	۸۷/٤	٥۳/۱
صدف	۱٦/۷	۹/۷	۹۳/٦	۲٥/۹
تقی‌آباد	۱۹/۷	۹	۸۰/٦	۳۹/۷
خیام	۱۹/۲	۱٦/٤	۲٦۹	۷۷
لشگر	۱۸	٦/٦	٤۳/٥	۲۳/۳
ویلا	۲۱/۷	۹/٤	۸۸/٥	٤٤/۸
الهیه	۳۸/۱	۱٥	۲۲٥	٦۹/٤
آوینی	٦۳/٤	۲۰/٥	٤۲۲	۱۰۰/٦
چمن	٦۳/۱	۲۳/٤	٥٤۹	۱۰٥/۷
امامیه	۳۳/۹	۲۷/٥	۷۳٥	۸۸/٤
خیام شمالی	٦۲/۲	۱۹/۱	۳٦۳/۷	۸۱/٤
خاقانی	۳۹/۹	۱۳/۸	۱۹۱	٤۲/٤
مفتح	٥۳/۷	۱۳/۲	۱۷٥	٤۲/٥
کریمی	٦۰	۲۰/۳	٤۱۱	۷۷/٦
حرم مطهر	۱۲	۳/۹	۱٥/۲	۱۸/۲

ترسیم نمودار جعبه‌ای[1] روشی مفید برای مصوّرسازی داده‌ها و درک سریع نحوه توزیع پراکندگی آن‌هاست. در شکل ۳ نمودار جعبه‌ای فصلی در دوره آماری نشان داده شده است. براساس این نمودار، دامنه تغییرات و همچنین فراوانی داده‌های پرت در فصل تابستان و پس از آن بهار کمتر و در فصول سرد سال زمستان و پاییز بیشتر است؛ به‌عبارتی با شروع نیمه دوم سال روند افزایشی غلظت شروع می‌شود؛ به‌نحوی‌که متوسط غلظت در فصل زمستان به بیشترین مقدار خود می‌رسد. متوسط غلظت در شش‌ماهه اول ppb ۳۳/٤ و در شش‌ماهه دوم سال ppb ۳۷/۹ محاسبه شده است.

1. Box Plot



شکل ۳- توزیع فصلی غلظت NO_2 شهر مشهد در طی دروه آماری ۱۳۹۳ تا ۱٤۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۰

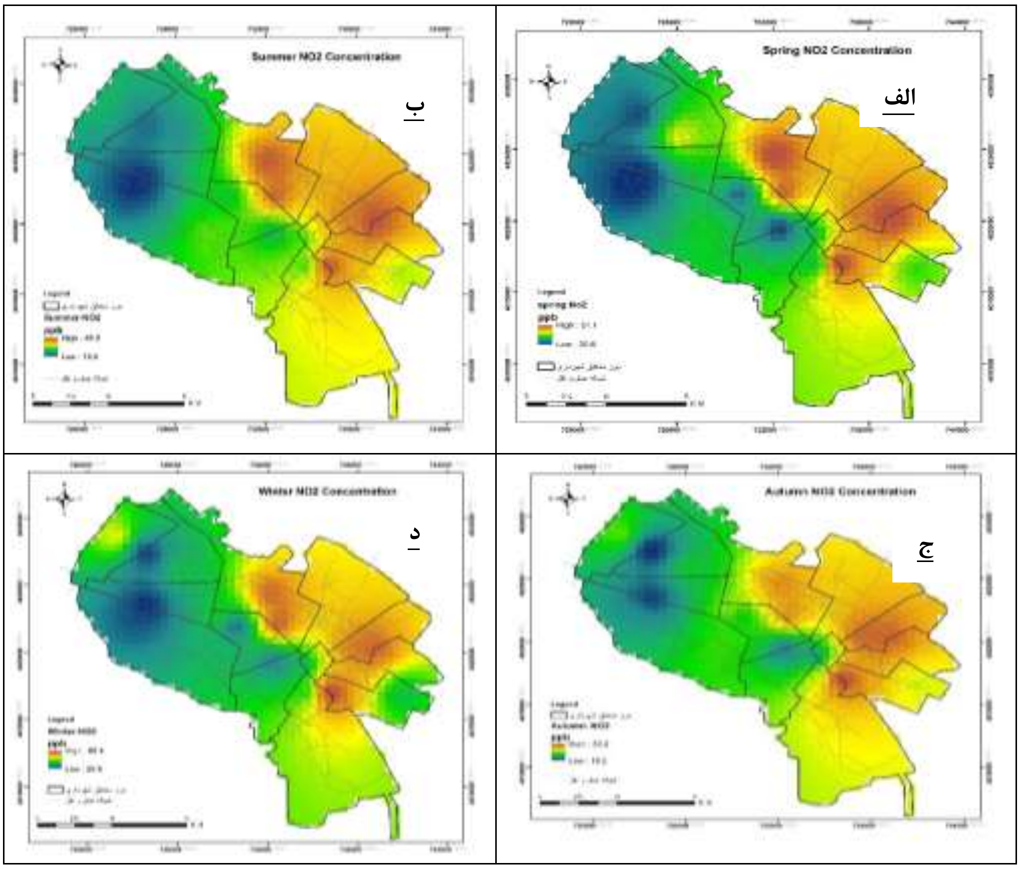
٤. ۲. توزیع فصلی NO_2

عملیات جبری روی نقشه‌های ماهانه که توسط تابع مپ الجبرا (نقشه جبری)[1] صورت گرفت، به تولید نقشه‌های فصلی منجر شد (شکل ٤) و مقادیر آماری این نقشه‌ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق شکل ٤ الف، در فصل بهار دامنه تغییرات از بیشترین غلظت با ppb ۵۱/۱ در مناطق شرق و شمالی شهر وکمترین آن (ppb ۲۰/٦) در بخش هایی از مناطق مرکزی و همچنین مناطق غرب و شمال غرب شهر ثبت شده است که مقدار انحراف معیار کم محاسبه‌شده در مقایسه با سایر فصول نشان از یکدست‌تر بودن توزیع این آلاینده در سطح شهر دارد. همانند فصل بهار، در فصل تابستان نیز مناطق غرب و شمال غرب مشهد کمترین غلظت NO_2 (ppb ۱۵/٦) را دارد (شکل ٤ ب). میانگین غلظت در این فصل ppb ۷/۳ ± ۳۱/۵ است که در مقایسه با فصل بهار کاهش داشته است و بیشترین غلظت (ppb ٤٦/۹) در مناطق شرق و شمال شرق و کمترین آن (ppb ۱۵/٦) در مناطق غرب شهر است. الگوی پراکنش فصل پاییز نیز با فصول بهار و تابستان مشابه است (شکل ٤ ج). هسته تمرکز این آلاینده در مناطق شرق و شمالی شهر واقع شده است و کمترین غلظت‌ها مطابق فصول گذشته در شمال غرب و غرب مشهد دیده می‌شود. دامنه غلظت این آلاینده از کمینه غلظت

---

1. Map Algebra

ppb ۱۹/۲ در غرب و شمال غربی تا بیشینه غلظت ppb ۵۳/۲ در شرق و شمال شـرق شـهر متغیر است (میانگین غلظت ppb ۹/۶± ۳۶/۶). آخرین فصل سال بیشـترین غلظـت NO_2 را دارد؛ به‌گونه‌ای‌که میانگین غلظت در این فصل ppb ۸/٤ ± ۳۹/۹ محاسبه شده است (جـدول ۲). درمجموع، ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مسـتقر در منـاطق رسـالت، سـمزقند، خیـام شمالی، خیام جنوبی، سجاد، تقی‌آباد، ساختمان و آوینی بیشترین غلظت و ایستگاه‌های مسـتقر در مناطق غرب و شمال غرب (ایستگاه‌هـای صـدف، ویلـا ، سـرافرازان و خاقـانی) کمتـرین غلظت را داشتند.



شکل ٤- نقشه پراکنش NO2 : الف- فصل بهار، ب- فصل تابستان، ج- فصل پاییز، د- فصل زمستان مشهد میانگین دوره آماری ۱۳۹۳-۱٤۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۰

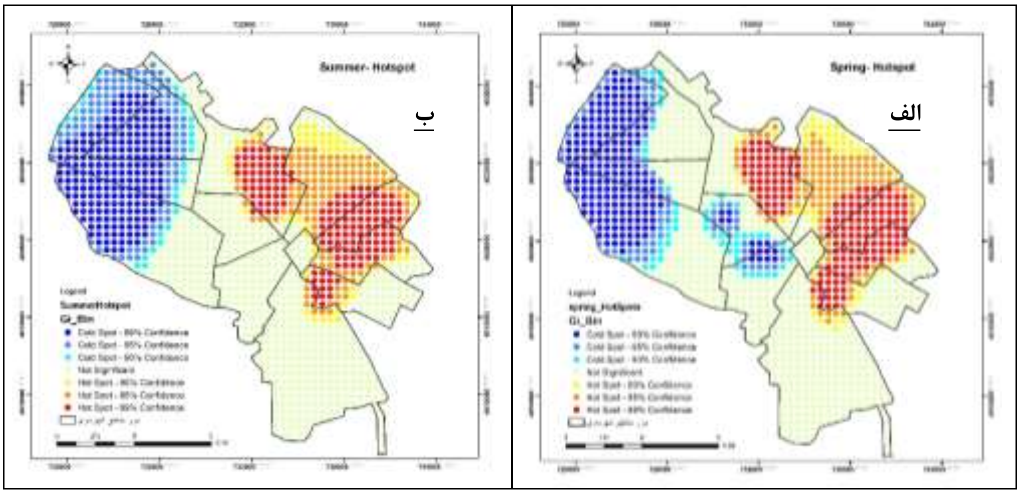
جدول ۲- مقادیر آماری نقشه‌های فصلی آلاینده NO_2 مشهد میانگین دوره آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

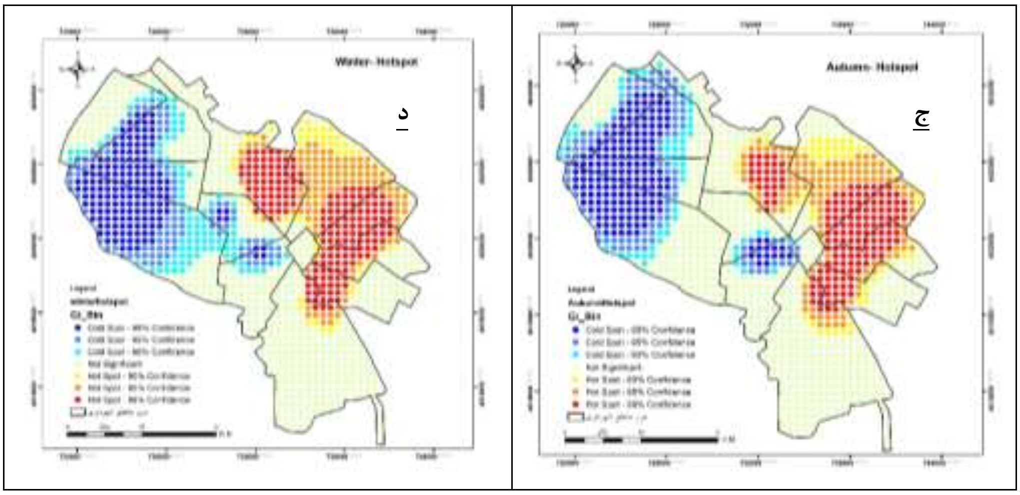
مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

	کمترین غلظت (ppb)	بیشترین غلظت (ppb)	میانگین غلظت (ppb)	انحراف معیار
فصل بهار	۲۰/۶	۵۱/۱	۳۵/۲	۶/۸
فصل تابستان	۱۵/۶	۴۶/۹	۳۱/۵	۷/۳
فصل پاییز	۱۹/۲	۵۳/۲	۳۶/۶	۶/۹
فصل زمستان	۲۰/۸	۶۰/۴	۳۹/۲	۸/۴
میانگین سالانه	۱۹/۱	۵۲/۹	۳۵/۶	۷/۴

۴. ۳. شناسایی نقاط داغ NO_2

براساس نقشه‌های تحلیل فضایی، گستره نقاط داغ در فصول مختلف سال (با سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد) در مناطق شرقی و پس از آن با غلظتی کمتر در مناطق شمال شرقی مشهد واقع شده است؛ این در حالی است که شکل‌گیری نقاط سرد عموماً در تمام فصول سال در مناطق غرب و شمال غرب مشهد است؛ البته براساس نقشه‌های به‌دست‌آمده در فصول بهار، پاییز و زمستان، نقاط سرد تاحدودی به مناطق مرکزی شهر نیز گسترش یافته است.





شکل ۵- نقشه موقعیت نقاط داغ و سرد آلایندهNO_2 : الف- فصل بهار، ب- فصل تابستان، ج- فصل پاییز، د- فصل زمستان شهر مشهد دوره آماری ۱۳۹۳-۱٤۰۰

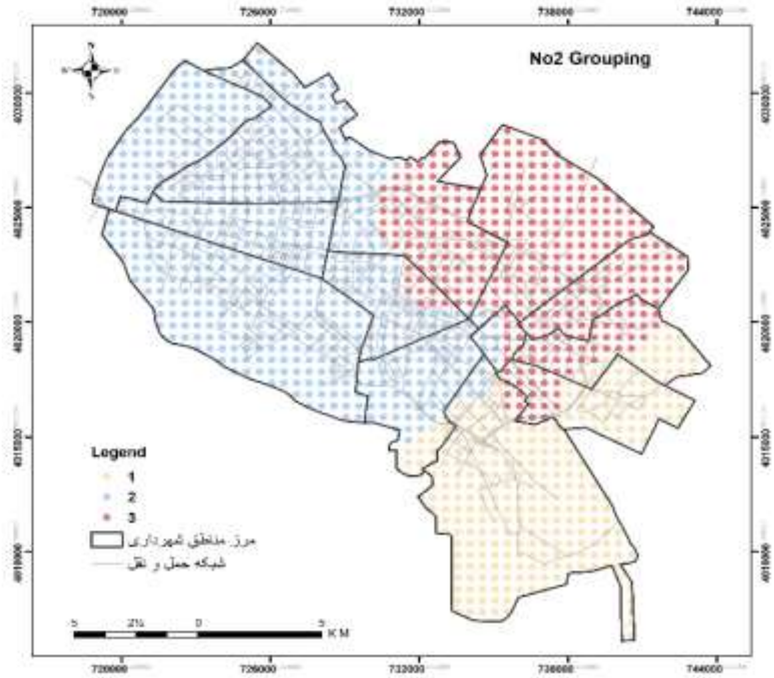
مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۰

ایستگاه‌های خیام شمالی، رسالت، سمزقند، ساختمان، آوینی، سجاد و تقی‌آباد در محـدوده نقاط داغ و ایستگاه‌های صدف، ویلا، سرافرازان و خاقانی در پهنه نقاط سـرد واقـع شـده‌انـد. براساس نقشه های فصلی، آرایش توزیع مکانی نقاط داغ و سرد مشابه است؛ با این تفاوت که تنها در فصل تابستان لکه نقاط سرد فقط در نیمه غرب و شمال غرب گستردگی دارد و مناطق مرکزی شهر را در بر نگرفته است (شکل ۵- ب).

٤. ٤. پهنه‌بندی یا تعیین نواحی همگن NO2

برای تحلیل خوشه‌ای نقشه‌ها ابتدا مقادیر عددی هریک از یاخته‌ها برای هر فصل به محیط نرم‌افزار تخصصی Minitab منتقل شد. بعد از تجمیع داده‌ها در ماتریسی به شـکل S آرایـش داده شد. در ادامه، تحلیل سلسه‌مراتبی به روش ادغـام وارد روی داده‌هـا صـورت گرفـت کـه درنهایت به ترسیم نقشه پهنه‌بندی یا همان نواحی همگن غلظت NO_2 برای شهر مشهد منجـر شد (شکل ٦). در این نقشه هریک از پهنه‌های شناسایی‌شده خصوصیات آماری خاص خود را دارد که در آن شباهت درون‌گروهی، حداکثر و شباهت بین‌گروهـی، حـداقل اسـت. براسـاس نتایج این تحلیل (شکل ٦)، سطح شهر مشهد در سه پهنه یا منطقه همگن تفکیک‌شدنی اسـت.

پهنه یا منطقه ۱ که در شکل ٦ با رنگ زرد مشخص شده است، با غلظت (ppb) ۳۷/۸ غلظت متوسط دارد که با ۷,٦٥۰ هکتار، ۲٤ درصد از مساحت شهر را به خود اختصاص داده است. نواحی از جنوب و جنوب شرق شهر در این پهنه قرار دارد. پهنه دوم با میانگین سالانه ppb ۲۹/۳ کمترین غلظت را دارد که در نقشه خروجی با رنگ آبی نشان داده شده است. درصورتی‌که خطی از شمال به جنوب شهر در نظر گرفته شود، تقریباً نیمه غربی در محدوده آبی یا دارای غلظت کم قرار می‌گیرد که با مساحت ۱٦,۳۷٥ هکتار، ٥۰ درصد از مساحت کل شهر را به خود اختصاص داده است. درنهایت، پهنه ۳ یا منطقه دارای غلظت زیاد (رنگ قرمز) است که میانگین غلظت در این منطقه (ppb) ٤۳/٥ محاسبه شده است و ۸,٤۲٥ هکتار (حدود ۲٦ درصد از کل مساحت شهر) که عمدتاً در مناطق شرق، شمال شرق واقع شده است، در این پهنه قرار دارد.



شکل ٦- پهنه‌بندی (نواحی همگن) NO_2 شهر مشهد در دوره آماری ۱۳۹۳-۱٤۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱٤۰۰

مسلم است، چنین نقشه‌ای شناخت بهتر و کامل‌تری از چگونگی توزیع آلاینده مطالعه‌شده را ارائه می‌کند. براساس این پهنه‌بندی، نیمه شرقی و شمال شرقی مشهد دارای بیشترین غلظت و نیمه غرب به‌خصوص شمال غرب شهر دارای بار آلودگی کمتری (میانگین غلظت دوره آماری هفت‌ساله) است. در جدول ۳ به‌تفصیل خصوصیات آماری هر پهنه در فصول مختلف محاسبه و درج شده است.

جدول ۳- خصوصیات آمار فصلی و سالانه NO_2 برای هریک از پهنه‌های (مناطق) شناسایی‌شده در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

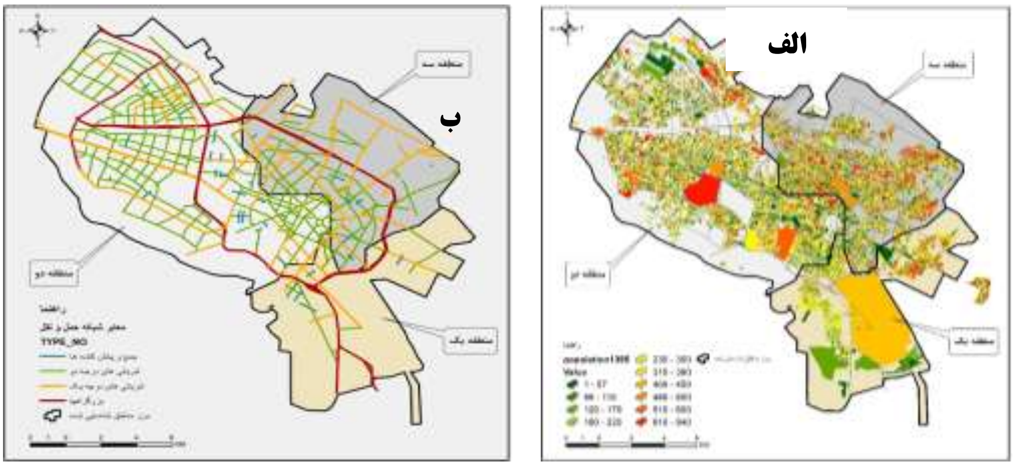
خصوصیات آماری پهنه	فصل	کمترین غلظت (ppb)	بیشترین غلظت (ppb)	میانگین غلظت (ppb)	انحراف معیار
پهنه غلظت متوسط یا زرد (منطقه ۱)	بهار	۳۳/۸	٤٤/٥	۳۷/٤	۲
	تابستان	۳۲/۳	٤۱	۳٤/۷	۱/۷
	پاییاز	۳٦/۳	٤۹/۲	٤۰/۱	۲/۱
	زمستان	۳۳/۹	٥۳/۷	٤۱/۹	۳/۲
	سالانه	۳٤/۳	٤۳/۳	۳۷/۸	۱/۸
پهنه غلظت کم یا آبی (منطقه ۲)	بهار	۲۰/٦	٤۲/۱	۲۹/۷	٤/۲
	تابستان	۱٥/٦	۳۹/٤	۲٥/٦	٤/۸
	پاییز	۱۹/۳	٤۲/٦	۳۰/۸	٤/۲
	زمستان	۲۰/۹	٤۷/٤	۳۲/٤	٤/۸
	سالانه	۲۰/۳	۳۹/۷	۲۹/۳	٤/٥
پهنه غلظت زیاد یا قرمز (منطقه ۳)	بهار	۳٥/۸	٥۱/۲	٤۳/٦	۲/۷
	تابستان	۳٥/۸	٤٦/۹	٤۰/۲	۲/۳
	پاییز	٤۱/۸	٦۰/٤	٤۹/۸	۳/۳
	زمستان	۳٦/٦	٥۳/۲	٤٤/٦	۲/۷
	سالانه	۳٥/۹	٥۰/٦	٤۳/٥	۲/۸

در واکاوی چرایی شکل‌گیری مناطق تفکیک‌شده (شکل ٦)، می‌باید به منابع انتشار این آلاینده توجه شود؛ ازاین‌رو در ادامه توزیع فضایی جمعیت به‌عنوان موتور متحرک مصرف

انرژی و تعدادی از مؤلفه‌های حمل‌ونقل سطح شهر بررسی شده است. در ابتدا لایه‌های جمعیت و حمل‌ونقل با لایه خروجی پهنه‌بندی مطابقت[1] داده شد. سپس با استفاده از تابع تحلیل مکانی[2] مشخصات آماری موردنیاز برای هریک از سه پهنه به‌صورت مجزا احصاء شد و با یکدیگر مقایسه تطبیقی شد.

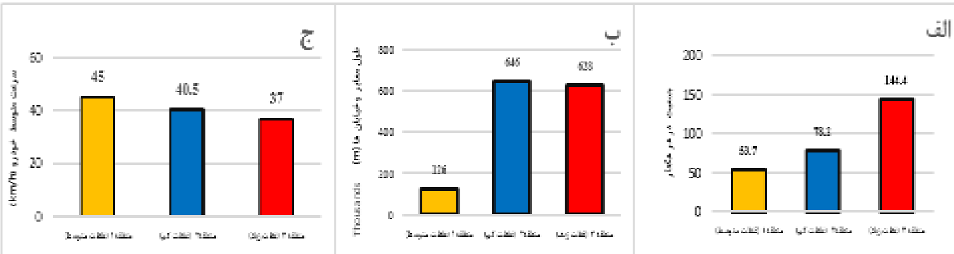
مطابق نقشه تراکم جمعیتی (شکل ۷ الف)، مناطق شرق و شمال شرقی شهر که در پهنه غلظت زیاد یا قرمز قرار دارند، دارای بیشترین تراکم جمعیتی‌اند. مسلم است که افزایش جمعیت باعث افزایش مصرف انرژی و طبعاً انتشار بیشتر آلاینده‌های هوا ازجمله NO_2 می‌شود. علاوه بر این، طول شبکه معابر و شریان های اصلی در پهنه ۳ (غلظت زیاد) کمتر از پهنه‌های ۲ و ۱ است. بنابراین سرعت حرکت خودروها در این منطقه کمتر (شکل ۸ ج) و بار ترافیکی بیشتر است که این عامل خود باعث انتشار بیشتر NO_2 از خودروها می‌شود. مطابق شکل ۷ ب، مجموع طول شبکه حمل‌ونقل شهری در مناطق با غلظت زیاد NO_x (منطقه قرمز)، ٦٤٦,٤٣٤/۳ متر و متوسط سرعت وسایل نقلیه در این بخش ۳۷ کیلومتر بر ساعت است؛ درحالی‌که مجموع طول این شبکه در مناطق با غلظت کم (مناطق غرب و شمال غربی شهر یا منطقه آبی یا ۲)، ٦٢٨,۷۲۰/٤ متر و متوسط سرعت خودروها ٤۰/٥ کیلومتر بر ساعت محاسبه شده است (شکل ۸).

1. Overlay
2. Spatial Analyst Tools



شکل ۷- الف- نقشه تراکم جمعیت در هر کیلومتر مربع، ب- نقشه معابر شبکه حمل‌ونقل مشهد

مأخذ: سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری مشهد (۱۳۹۷)



شکل ۸- نمودارهای الف- تراکم جمعیت در هر هکتار، ب- طول معابر و شریان ها (km)، ج- سرعت متوسط خودرو (km/h)

مأخذ: محاسبات نگارندگان، ۱۴۰۰

بنابراین در مناطق با غلظت کم (رنگ آبی) به‌دلیل خطوط ارتباطی کامل‌تر، ترافیک روان‌تر و سرعت خودروها بیشتر است که باعث انتشار کمتر آلاینده‌ها در مقایسه با مناطق پرترافیک می‌شود. از طرفی تمرکز و تراکم زیاد جمعیت در مناطق شرقی شهر و شبکه کمتر توسعه‌یافته از شریان‌های حمل‌ونقل، باعث انتشار بیشتر و درنهایت شکل‌گیری هسته‌هایی با تراکم زیاد از آلاینده NO_2 می‌شود. همچنین مجاورت این محدوده با اراضی کشاورزی، واحدهای کارگاهی و صنعتی واقع در مناطق شرق و شمال شرق را می‌توان جزو دلایل غلظت زیاد NO_2 عنوان

کرد. درمقابل، مناطق غرب و شمال غرب مشهد دارای تراکم کمتر جمعیت، سرانه فضای سبز بسیار بیشتر، ارتفاع نسبی بیشتر، فاصله بیشتر از صنایع و منابع ثابت انتشار آلاینده هوا، مجاورت به مناطق ییلاقی طرقبه و شاندیز و... برخوردار است که می‌تواند در انتشار کمتر آلاینده‌ها نقش داشته باشد.

۵. نتیجه‌گیری

نخستین آورده این پژوهش را می‌توان تهیه و ترسیم نقشه‌های توزیع فصلی NO_2 مشهد با به‌کارگیری ۸٤ نقشه ماهانه (دوره آماری هفت‌ساله) دانست که بررسی مطالعات نشان داد، کامل‌ترین مطالعه فضایی این آلاینده برای مشهد است. براساس نقشه‌های ترسیمی پراکنش NO_2 تقریباً در همه فصول از الگویی مشابه تبعیت می‌کند (نیمه شرقی شهر بیشترین و نیمه غربی کمترین غلظت را دارد). بیشترین غلظت این آلاینده در فصل زمستان (ppb۳۹/۲) است و کمترین آن مربوط به فصل تابستان (ppb۳۱/۵) است که این نتایج با نقشه‌های سالانه پراکنش No_2 و $Pm_{2.5}$ شهر مشهد که توسط مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد (۱۳۹۷، ۱۳۹۸، ۱۳۹۹) هرساله تهیه و منتشر می‌شود، مطابقت دارد؛ بااین‌حال، اسماعیلی (۱۳۹۸) بیشترین غلظت $Pm_{2.5}$ مشهد را فصل پاییز و کمترین آن را فصل بهار گزارش داد که از لحاظ زمانی با نتایج این پژوهش متفاوت است. کانون نقاط داغ NO_2 در مناطق شرق، شمال شرق و قسمت‌هایی از نواحی شمالی مشهد است و در مقابل هسته نقاط سرد در مناطق غرب و شمال غربی مشهد واقع شده است. در همین ارتباط، اسماعیلی و امینی (۱۳۹۹) نتایج مشابهی را درباره نقاط داغ آلاینده $Pm_{2.5}$ مشهد گزارش دادند که حاکی از الگوی مشابه در توزیع مکانی آلاینده وNo_2 و $Pm_{2.5}$ است.

نتایج تحلیل خوشه‌بندی سه پهنه یا منطقه همگن NO_2 را برای مشهد مشخص کرد: پهنه اول یا منطقه با غلظت متوسط شامل نواحی از جنوب و جنوب غرب مشهد می‌شود؛ پهنه دوم که کمترین غلظت آلاینده مدنظر را دارد، تقریباً نیمه غربی شهر را در بر می‌گیرد؛ پهنه سوم با بیشترین غلظت، عمدتاً مناطق شرق و شمال شرق مشهد را فراگرفته است. این نتایج با نقشه پهنه‌بندی نواحی همگن $Pm_{2.5}$ مشهد همخوانی دارد، با این تفاوت که محدوده و مساحت

نواحی شناسایی‌شده کمی متفاوت است (اسماعیلی، ۱۳۹۷)؛ بااین‌حال، نتایج هر دوی این پژوهش‌ها، در شرق و جنوب شرق مشهد، بیشترین و در شمال غرب و غرب، کمترین غلظت آلاینده‌ها را نشان می‌دهد و کمربندی حائل بین این دو پهنه از شرایطی حد وسط برخوردار است.

واکاوی آماری و مقایسه تطبیقی بین پهنه‌های شناسایی‌شده نشان داد، تراکم جمعیت در پهنه دارای غلظت زیاد، به‌طور معناداری در مقایسه با سایر پهنه‌ها بیشتر است. همچنین میانگین سرعت خودروها در این پهنه کمتر است که بیانگر ترافیک بیشتر و انتشار بیشتر آلاینده‌هاست. از طرفی این پهنه (نقاط داغ) جزو مناطق نسبتاً محروم و کمتر توسعه‌یافته محسوب می‌شود که فرسوده‌ترین خودروها با بیشترین آلایندگی و بیشترین تعداد موتورسیکلت‌های مستهلک و دودزا در این پهنه وجود دارد. در تکمیل استنتاج یافته‌های پژوهش، مجاورت این پهنه با زمین‌های‌کشاورزی و کارگاه‌های تولیدی و صنعتی را نباید نادیده گرفت که به‌دلیل مجاورت، به‌صورت مستقیم مناطق شرقی و جنوب شرقی مشهد را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. مجموع دلایل ذکرشده به غلظت زیاد NO_2 و شکل‌گیری نقاط داغ در این محدوده از شهر منجر شده است. درمقابل، حمل‌ونقل روان‌تر با آلایندگی کمتر، تراکم کمتر جمعیت، برخورداری از ارتفاع بیشتر و نزدیکی به مناطق کوهستانی و ییلاقی طرقبه و شاندیز نیز را می‌توان از دلایل غلظت کمتر این آلاینده در غرب و شمال غرب مشهد دانست. ازآنجاکه تدوین برنامه‌ها و اثربخشی اقدامات کنترلی و کاهشی مستلزم تعیین موقعیت مکانی آلاینده‌هاست، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان منبع اطلاعات تخصصی قابل‌استناد، برای تدوین برنامه‌های رصد، کاهش و کنترل آلاینده NO2 مشهد به کار رود.

کتابنامه

۱. اسماعیلی، ر. (۱۳۹۷). نواحی همگن آلودگی هوای شهر مشهد. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، *۷*(۱٦)، ۲٤۰–۲۲۷.

۲. اسماعیلی، ر.، و امینی، ف. (۱۳۹۹). شناسایی نقاط داغ غلظت ذرات معلق (PM2.5) هوای شهر مشهد. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، *۱۱*(٤٤)، ۷۸–٦۳.

۳. بهاری، ر.، عباسپور، ر.، و پهلوانی، پ. (۱۳۹٤). پهنه‌بندی آلودگی ذرات معلق با استفاده از مدل‌های آماری محلی در GIS (مطالعه موردی، شهر تهران). *نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری*، (۳)، ۱۷۳-۱٦٥.

٤. تقوی، ه. (۱۳۹۱). *توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌های شاخص آلودگی هوای شهر مشهد و عوامل موثر بر آن* (پایان‌نامه منتشرنشده کارشناسی‌ارشد)، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

٥. جولایی، ف.، پیروی، ر.، اسماعیلی، ح.، کتابی، د.، و متعلمی، آ. (۱۳۹٦). بررسی تغییرات غلظت مونوکسید کربن و PM2.5 در شهر مشهد در سال ۱۳۹٥. *نشریه تحقیقات سلامت در جامعه*، ۳(۳)، ٤٥-۳٤.

٦. خرسندی، ح.، امینی تپوک، ف.، کارگر، ح.، و موسوی مغانجوقی، س. (۱۳۹۱). بررسی کیفیت بهداشتی هوای شهر ارومیه براساس شاخص AQI. *مجله پزشکی ارومیه*، *۲۳* (۷)، ۷۷٥-۷٦۷.

۷. خسروی، ی.، و بحری، ع. (۱۳۹۷). استفاده از تکنیک‌های آمار فضایی جهت بررسی تغییرات زمانی-مکانی غلظت کلروفیل a در خلیج فارس. *مجله علمی- پژوهشی زیست دریا*، *۱۰* (۳۷)، ٤٦-۳۳.

۸. علیجانی، ب. (۱۳۹٤). تحلیل فضایی. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، *۲* (۳)، ۱٤-۱.

۹. مرکز آمار ایران. (۱۳۹۷). *سالنامه آماری کشور ۱۳۹٥*. دفتر ریاست روابط عمومی و همکاریهای بین الملل مرکز آمار، تهران.

۱۰. مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شهر مشهد. گزارش‌های سالانه ۱۳۹٦، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸. بازیابی از https://epmc.mashhad.ir

۱۱. نادیان، م.، میرزایی، ر.، و سلطانی محمدی، س. (۱۳۹۷). کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی-زمانی آلاینده PM2.5 (مطالعه موردی: شهر تهران). *مجله مهندسی بهداشت محیط*، *٥*(۳)، ۲۱۳-۱۹۷.

12. AEA Technology Environment. (2005). Damages per tone emission of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOCs from each EU25 member State (excluding Cyprus) and surrounding seas. In *Service contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe* (CAFE) programme (pp. 4-20). Oxon, UK: AEA Technology Environment.

13. Chu, H. J., Huang, B., & Lin, CY. (2015). Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM10-PM2.5 relationships. *Atmospheric Environment*, (102), 176-182.

14. Clean Air Alliance of China (CAAC). (2013). *State council air pollution prevention and control action plan, issue II* (English translation). Retrieved October 8, 2015, from http://en.cleanairchina.org/product/6346.html
15. Kim, KH, Kabir, E, & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ International*, (74), 136-43.
16. Ku, C. (2020). Exploring the spatial and temporal relationship between air quality and urban land-use patterns based on an integrated method. *Sustainability*, *12*(2964), 1-16.
17. Li, Ch., Dai, Zh., Yang, L., & Ma, Zh. (2019). Spatiotemporal characteristics of air quality across Weifang from 2014–2018. *International Journal of Environment Research Public Health*, *16*(3122), 2-15.
18. Nanda, Ch., Kant, Y., Gupta, A. & Mitra, D. (2018). Spatio-temporal distribution of pollutant trace gases during Diwali over India. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* (5), 339-350.
19. Nunez-Alonso, D., Vicente, L., Manzoor, S. & Caceres, J. (2019). Statistical tools for air pollution assessment: multivariate and spatial analysis studies in the Madrid region. *Journal of Analytical in Chemistry*, *2019*, 1-9.
20. Pu, H., Luo, K., Wang, P., Wang, S., & Kang, S. (2017). Spatial variation of air quality index and urban driving factors Linkage: Evidence from Chinese cities. *Environmental Science Pollution Research*, (24), 4457-4468.
21. Ryu, J., Park, C., & Jeon, S. W. (2019). Mapping and statistical analysis of NO2 concentration for local government air quality regulation. *Sustainability*, (11), 1-18.
22. US EPA. (2014). national ambient air quality standards (NAAQS). Retrieved from http://epa.gov/air/criteria.html.
23. Varshney, C. K., & Singh, A.P. (2003). Passive samplers for NOx monitoring: A critical review. *Environmentalist*, (23), 127–136.
24. Wang L., Wang J., Tan X., & Fang, C. (2020). Analysis of NOx pollution characteristics in the atmospheric environment in Changchun City. *Atmosphere,* (11), 30. 1-12.
25. Wang, Z., & Fang, C. (2016). Spatial-temporal characteristics and determinants of PM2.5 in the Bohai Rim Urban Agglomeration. *Chemosphere*, (148), 148-162.
26. Zhang, Q., Geng, G. N., & Wang, S. W. (2012). Satellite remote sensing of changes in NOx emissions over China during 1996–2010. *China Science Bulletin*, (57), 2857–2864.
27. Zhang, Q., Streets, D. G., & He, K. (2007). Nox emission trends for China, 1995–2004: The view from the ground and the view from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112*(18), 1-18